

## ЛАВИННЫЙ ПРОБОЙ В ТРАНЗИСТОРАХ: ТЕОРИЯ И ПРИМЕНЕНИЕ НА ПРИМЕРЕ КАЧЕРА БРОВИНА

Биюмен Е.А. Войткус И.А., студенты гр.361401

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,  
г. Минск, Республика Беларусь

Храмович Е.М. – канд. физ.-мат. наук, доцент

**Аннотация.** В статье рассматривается явление лавинного пробоя в транзисторах, включая его теоретические основы и практическое применение на примере качера Бровина. Качер Бровина — это блокинг-генератор, использующий лавинный пробой для генерации высокочастотных колебаний. В статье описана схема качера Бровина, принцип его работы, а также процесс сборки. Представлены результаты работы качера, демонстрирующие его способность генерировать высокое напряжение. Кроме того, обсуждаются перспективы изучения лавинного пробоя и его применения в различных полупроводниковых приборах.

**Ключевые слова.** Лавинный пробой в транзисторах, качер Бровина, блокирующий генератор, транзистор.

Лавинный пробой – это физическое явление, характеризующееся резким возрастанием тока в диэлектрических и полупроводниковых материалах, обусловленное ударной ионизацией при приложении к ним интенсивного электрического поля [1, 2]. В современной технике это явление используется, например, для стабилизации напряжения (диоды Зенера) и детектирования слабых сигналов (лавинные фотодиоды).

Электрическое поле может ускорить носители (электроны или дырки) до точки, где они сталкиваются с атомами кристаллической решетки, создавая новую электронно-дырочную пару. Эта пара может генерировать дополнительные пары, что приводит к самоподдерживающемуся лавинному эффекту, что показано на рисунке 1. Напряжение пробоя увеличивается с ростом температуры из-за уменьшения длины свободного пробега между столкновением носителя заряда с атомом [1].

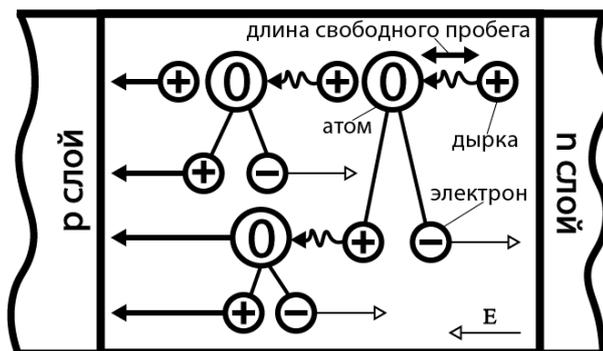


Рисунок 5 – Схема развития пробоя в р-n-переходе.

Лавинный пробой может происходить в двух режимах: обратимом и необратимом. В некоторых материалах, если быстро снизить напряжение ниже критического значения, процесс пробоя может быть обращён вспять. Это происходит потому, что образовавшиеся электронно-дырочные пары успевают рекомбинировать, прежде чем нанести необратимый ущерб кристаллической решетке материала. В других веществах или при более интенсивных условиях пробой становится необратимым. В лавинном процессе ударной ионизации часто происходит нагрев из-за увеличения тока, что приводит к тепловому повреждению кристалла. Для транзистора КТ805БМ критическая температура составляет +150° С [3]. Характеристики лавинного пробоя сильно зависят от свойств материала, таких как энергия лавинной зоны, коэффициенты ионизации и диэлектрическая проницаемость. Примеси и дефекты также могут существенно влиять на поведение пробоя. Факторы окружающей среды, такие как давление и температура окружающей среды, тоже могут играть роль в модуляции процесса пробоя [4].

Качер Бровина (качатель реактивностей) – это разновидность блокирующего генератора, который использует принцип лавинного пробоя для генерации высокочастотных сигналов. Он состоит из биполярного (или полевого) транзистора и нескольких пассивных компонентов. Качер был изобретен советским радиоинженером Владимиром Ильичом Бровиным в 1987 году, как генератор для электромагнитного компаса [5].

Работа Качера, схема которого приведена на рисунке 2, начинается с зарядки конденсатора С1. Затем этот заряд проходит через транзистор VT1, который превращается из изолятора в проводник, когда напряжение на нем превышает напряжение пробоя (начало лавинного процесса). Этот внезапный переход генерирует сильный импульс тока, который проходит первичную обмотку L1, вызывая появление напряжения. Благодаря электромагнитной индукции, резонансу и разнице в числе

витков между первичной и вторичной обмотками происходит резкое увеличение напряжения, что приводит к появлению коронарных и искровых разрядов (ионизация атмосферных газов). В итоге полученное напряжение находится в диапазоне от 2000 до 5000 В (значение приблизительное, так как основывается на длине полученного стримера, которая зависит от факторов окружающей среды).

Лавинный пробой является ключевым элементом работы качера Бровина. Он обеспечивает стабильность частоты, обеспечивая точную временную привязку открытия (закрытия) транзистора, что способствует стабильности частоты колебаний [5].

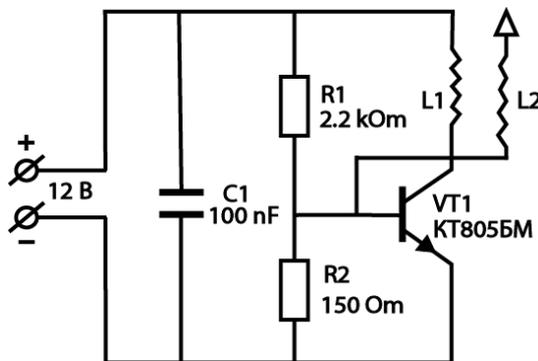


Рисунок 6 – Схема качера Бровина.

Параметры транзисторов и схемы могут влиять на характеристики лавинного пробоя и, следовательно, на работу качера Бровина. Некоторые из важных факторов:

- *напряжение питания*: более высокое напряжение питания увеличивает вероятность лавинного пробоя, что может привести к более сильным и частым колебаниям, но также может снизить стабильность и увеличить риск необратимого повреждения транзисторов;
- *тип транзистора*: транзисторы с низким напряжением пробоя будут более склонны к лавинному пробоя, при этом мощность уменьшится;
- *индуктивность и емкость*: эти параметры схемы могут влиять на скорость нарастания напряжения коллектора и, следовательно, на момент возникновения лавинного пробоя [3].

Важно отметить: лавинный пробой по своей природе нестабилен и может привести к повреждению кристалла транзистора, если не контролировать его должным образом.

При сборке качера Бровина мы использовали: обмоточный провод (диаметр 0,15 мм), которым обмотали катушку (диаметр 25 мм), высота намотки 80 мм, количество витков около 1000. Провод (диаметр 3 мм), диаметр катушки 50 мм, количество витков 3,5, биполярный транзистор KT8055M (VT1), пленочный конденсатор на 100 нФ (C1), резисторы 2,2 кОм (R1) и 150 Ом (R2), гнездо для подключения штекера блока питания, выключатель.

Сборка происходит следующим образом: вставляем первичную обмотку в верхнюю часть пластикового корпуса, в центр первичной обмотки прикрепляем вторичный контур. Вставляем в корпус выключатель. Далее электронная часть: припаиваем один конец резистор на 150 Ом к эмиттеру, а второй конец к базе транзистора. Резистор на 2,2 кОм припаиваем также на базу транзистора. Один выход пленочного конденсатора припаиваем к эмиттеру транзистора, а второй выход к резистору на 2,2 кОм. Вырезаем в корпусе отверстие для разъема питания. К разъему питания припаиваем два провода: минус от разъема питания припаиваем к эмиттеру транзистора, а плюс на выключатель. Берем ещё один провод, один конец припаиваем к выключателю, а второй на место соединения конденсатора с резистором. Провод от вторичной катушки припаиваем к базе транзистора. Берем два провода, один припаиваем на плюс выключателя, второй к коллектору транзистора. Подсоединяем их к первичной катушке. Качер собран, фотографию готового прибора можно увидеть на рисунке 3. В качестве питания будем использовать блок питания с выходным напряжением 12 В и силой тока 0,7 – 1,5 А.

Включаем экспериментальную установку, на кончике вторичной обмотки, оставшейся снаружи, можно увидеть маленький сине-фиолетовый огонёк, а при поднесении лампочки, она самопроизвольно загорается, как показано на фотографиях (Рисунок 4).

Лавинный пробой – это явление, при котором резкое увеличение тока в полупроводнике происходит под влиянием высокого электрического поля [1]. Оно может быть использовано в полупроводниковых устройствах для контроля, усиления или генерации сигналов. Например, в стабилитронах (диодах), лавинный пробой применяется для поддержания постоянного напряжения при изменении тока. Также полевые транзисторы с изолированным затвором используют данное явление для управления силой тока. Они обеспечивают высокую надежность и защиту от электростатических разрядов. Для генерации колебаний в диапазоне сверхвысоких частот лавинный пробой используют лавинно-пролётные диоды [3]. Такие диоды применяются в радарх, радиосвязи и высокочастотных приборах. Также лавинные фотодиоды используют данное явление для усиления фототока, что позволяет обнаружить очень слабые световые сигналы. Применяются в фотодетекторах, оптических приборах и системах связи. Мы нашли несколько перспектив изучения лавинного пробоя. Это явление

происходит в микроплазменных каналах, и его задержка может быть использована для изучения глубоких центров (дефекты, связанные с примесями или дефектами кристаллической решетки) в полупроводниках [3]. Изучение этих центров способствует более глубокому пониманию процессов, происходящих в полупроводниках, и способствует разработке более надежных устройств. Изучение лавинного пробоя помогает в разработке автоматизированных установок для изучения микроплазменного пробоя в р-п переходах и позволяет ускорить исследования.



Рисунок 3 – Качер Бровина.



Рисунок 4 – Демонстрация работы качера.

В заключении мы хотим отметить результаты нашей работы. Лавинная ударная ионизация – это интересное физическое явление, имеющее как применение в современных устройствах, так и перспективы изучения. Этот процесс лежит в основе работы качера Бровина и используется для генерации высокочастотных сигналов. После пробоя кристалл транзистора полностью восстанавливается, что объясняется использованием обратимого лавинного пробоя, в отличие от теплового, который для полупроводника является губительным.

Важно отметить: большинство утверждений о работе качера Бровина основаны на предположениях его изобретателя, Владимира Ильича Бровина, поэтому необходимы дальнейшие исследования для подтверждения этих результатов.

**Список использованных источников:**

1. *Avalanche breakdown* [Электронный ресурс]. Режим доступа: [https://en.wikipedia.org/wiki/Avalanche\\_breakdown](https://en.wikipedia.org/wiki/Avalanche_breakdown). Дата доступа: 24.02.2024.
2. *Power MOSFET avalanche design guidelines*. Режим доступа: [https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-Power MOSFET avalanche design guidelines-ApplicationNotes-v01\\_00-EN.pdf?fileId=8ac78c8c882315570188295e1c6a22f7](https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-Power_MOSFET_avalanche_design_guidelines-ApplicationNotes-v01_00-EN.pdf?fileId=8ac78c8c882315570188295e1c6a22f7). Дата доступа: 24.02.2024.
3. *Schematok* [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://shematok.ru/transistor/kt805bm>. Дата доступа: 24.02.2024.
4. *What is Avalanche Breakdown?* [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.electrical4u.com/avalanche-breakdown/>. Дата доступа: 24.02.2024.
5. *Качер Бровина - что это такое и каково его практическое применение?* [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://fb.ru/article/137018/kacher-brovina---chto-eto-takoe-i-kakovo-ego-prakticheskoe-primenenie-kak-sdelat-kacher-brovina>. Дата доступа: 25.02.2024.

## **AVALANCHE BREAKDOWN IN TRANSISTORS: THEORY AND APPLICATION ON THE EXAMPLE OF BROVIN'S KACHER**

*Biyumen E.A. Voitkus I.A., students of gr.361401*

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics,  
e. Minsk, Republic of Belarus*

*Khramovich E.M. - Candidate of Physical and Mathematical Sciences, associate  
professor*

**Annotation.** The paper deals with the phenomenon of avalanche breakdown in transistors, including its theoretical basis and practical application on the example of Brovin's kacher. Brovin's kacher is a blocking generator that uses avalanche breakdown to generate high-frequency oscillations. The paper describes the schematic of the Brovin's kacher, the principle of its operation, and the assembly process. Results of the swing generator are presented, demonstrating its ability to generate high voltages. In addition, the prospects of studying avalanche breakdown and its application in various semiconductor devices are discussed.

**Keywords.** Avalanche breakdown in transistors, Brovin's kacher, blocking oscillator, transistor.